



TITLE:

## <講演2> 中性子利用が拓く科学技術、核物理からがん治療まで

AUTHOR(S):

代谷, 誠治

---

CITATION:

代谷, 誠治. <講演2> 中性子利用が拓く科学技術、核物理からがん治療まで. 京都大学附置研究所・センターシンポジウム: 京都からの提言-21世紀の日本を考える 2007, 2: 29-44

ISSUE DATE:

2007

URL:

<http://hdl.handle.net/2433/66383>

RIGHT:

## 中性子利用が拓く科学技術、核物理からがん治療まで

原子炉実験所長 代谷 誠治

皆さん、おはようございます。このように多くの方にお集まりいただいております。お話を聞いていただき、非常に有難く存じます。

私は、京都大学大阪出張所の所長という感じでございまして、今日は「中性子科学が拓く科学技術、核物理からがん治療まで」と題するお話をさせていただきます。先ほど、九後さんから、中性子とか、陽子とか、難しいところはすべてお話いただきましたので、これらについてはできる限り簡略にご紹介させていただきたいと思います。

今日のお話では、原子炉実験所と湯川博士との関係から始まりまして、この機会に「大阪出張所」である原子炉実験所の紹介をさせていただき、どのような研究をしているか、概略をご説明し、また、新しく今プロジェクトとして進めつつある加速器で動かす原子炉のお話をさせていただいて、その後のがん治療のお話に移らせていただこうと考えています。

ただ、ちょっと気にしておりますのが、お食事前のがん治療のお話をするということです。衝撃的な映像が出てくるかも知れませんが、そこのお話は許しいただきたいと思います。

原子炉実験所の設置目的は「原子炉による実験及びこれに関連する研究を行う」ということであり、研究用の原子炉を持っています。設置形態としては、京都大学の附置研究所であって、先ほどのお話にございました全国大学の共同利用研究所となっています。

原子炉実験所という名前から、原子力の研究ばかりやっているとと思われるかも知れませんが、実は、理・工・農・医・薬から考古学に亘る非常に幅広い分野にご利用いただいているという状況にあります。京都大学大学院との関係も工学、エネルギー科学、理学、農学、医学研究科の協力講座があり、5研究科に跨って教育を分担しています。

さらに、原子炉を大阪大学と共同で建設することになり、大阪に設置された共同利用研究所ということもありまして、大阪大学、原子炉の設置を提言した日本学術会議、実際に共同利用に参加されている国公立大学、それに京都大学から選出されたそれぞれ3名ずつの教授が原子炉実験所選出の12名の教授とともに運営を行う体制になっています。

さて、原子炉実験所ができるきっかけとなりましたのは、1955年、昭和30年に行われた日本学術会議の「原子力に関するシンポジウム」で「関西に研究用の原子炉をつくろうではないか」との話が持ち上がり、提言にまとめられたことです。

そして、初代の原子炉設置準備委員会の委員長を湯川博士にお務めいただきました。原子炉実験所は湯川博士のお陰で誕生したと言えます。その後、ご存じの方もいらっしゃると思いますが、流れ流れてと言うと語弊がありますが、幾多の紆余曲折の末に現在の大阪府泉南郡熊取町朝代の地に研究用原子炉の設置が決定した次第です。

この研究用原子炉、実は現在、使用するウラン燃料を濃縮度の低いものに交換するために必要な手続きの最中で運転を休止していますが、昭和39年に初めて臨界を達成して運転を開始しました。原子炉が動き出した翌年から共同利用研究に供されています。ちなみに、今、原子力発電所の制御棒引き抜けに伴う臨界事故が新聞紙上を騒がしていますが、私達の原子炉では起こり得

ない事象です。

さて、湯川博士と原子力との関わりは、朝永博士も含めてでございますが、先ほど九後さんのお話にも出てまいりました「ラッセル・アインシュタイン宣言」が原点になっていると思います。原子力については、この宣言の中で、お二人は核爆弾の脅威を指摘して、戦争の廃絶、平和的手段による紛争解決を勧告されました。これについては、後ほどパネルディスカッションで話題に上ると思いますが、「科学者の社会的責任」と密接に関連しています。

我が国における原子力の平和利用について、湯川博士には非常にご尽力いただきました。博士は、初代の原子力委員会の委員をお務めになりました。この関係で、私達の原子炉の建設準備委員会の初代委員長もお務めいただいたということでございます。

1975年には湯川・朝永宣言「核抑止を超えて」を発表され、核兵器の廃絶を訴えられました。

いずれにしても原子力の世界に身を置く私達としては、原子力の平和利用を推進することが責務と考えています。また、今日のお話との関連で申しますと、湯川博士は晩年にがんになりましたが、ご自身の研究対象とされた中間子を使ったがん治療の実現を夢見ておられました。これは未だに実現していませんが、今は私達の研究所で中性子を使ったがん治療を進めて成果を挙げています。

さて、研究用原子炉ですが、日本のどこにあるかというと、茨城県、神奈川県、それから大阪府にあります。茨城県には、独立行政法人日本原子力研究開発機構の原子炉、それから東京大学の原子炉がございます。神奈川県には(株)東芝の原子炉がございます。大阪府には、実は2つ、京都大学と近畿大学が持っています。先ほど総長が「京都大学だけが…」と言われて、「いやそうじゃない」と訂正されましたが、大学で原子炉を持っているのは、現在では東京大学、近畿大学、京都大学の3つです。そのうちの2つの大学の原子炉が大阪府にあるということです。

私達の研究所の所在地は、関西空港のすぐ近くにある京都大学の熊取キャンパス、大阪府泉南郡熊取町に位置します。このため、京都大学のメインキャンパスへ行くのに実は2時間以上かかります。私の次に講演されます松沢さんは、冗談でアイちゃんのお父さん、あるいは旦那さんと呼ばれていますが、それはさておき、犬山市にいらっしゃいます。「京都大学のメインキャンパスに行くのにどれだけ時間がかかるか」という会話をした結果、実は熊取町の方が遠い(?)ことがわかりました。新幹線の有無が影響しているのですが…。

これは、ちょっとした宣伝でございますが、もうすぐ構内にある桜が咲きます。その時期には構内を開放致します。花見にお出でいただければ幸いです。4月の初めには一般公開として施設を開放しています。秋にはアトムサイエンスフェアを開催しています。そのような機会に来ていただいて、今日私がお説明できない部分を直接見ていただければ有難く存じます。

右に原子炉実験所の航空写真を示します。敷地面積は約10万坪で、先ほど桜公開と申しましたが、桜の木が約200本植わっています。実は、この写真は桜が咲いているときに撮ったものですが、空から撮ると桜花は地面とあまり色が変わらないので残念ながら判然としません。正門から入って正面奥に5千キロワットで40年以上前から運転している原子炉がございます。



原子炉実験所の航空写真(2006年4月撮影) 敷地面積:約10万坪  
桜:約200本

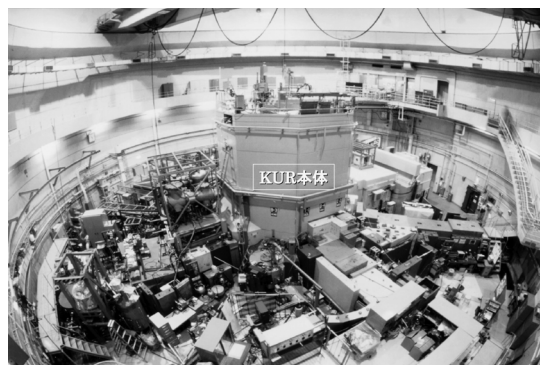
その手前に30年以上前から運転しているミニチ

ユアの原子炉、臨界集合体がございます。その横に新しく加速器を収納する建物を造りました。アメダスが設置されている気象観測塔から見た写真を右に示します。加速器が収納されているイノベーションリサーチラボは2、3年前に完成しました。右奥は30年以上前、中央奥は40年以上前の建物ですが、3つの主要施設が並んでいます。



原子炉実験所の3主要施設

5千キロワットの熱出力で運転する原子炉は、今止まっていると申しましたが、その原子炉が置かれている部屋の中に入りますと、8角柱のようなものが中央にあります。そこから中性子を八方に引き出すということでこのような形にしたのかどうかわかりませんが…。



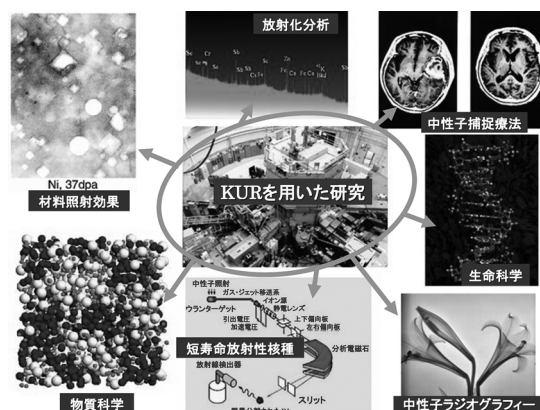
研究用原子炉(KUR)炉室

重水照射設備でがん治療を行っているのですが、その他にもいろいろな装置が設置されています。施設見学においでいただければ見ていただけます。

水面下、6～7メートルのところにある運転中の原子炉を上から見ますと、京都大学の色、ダークブルーに光っているチェレンコフ光が見えます。なお、この光は、原子炉の出力が高くなると段々明るくなり、白っぽく見えてしまうことになります。燃料の部分が強く光りますが、その周りに反射体が置かれ、その外側に中性子を取り出す管などが配置されています。

原子炉を用いた研究でございますが、「40年以上も前の古い装置を使って何をやっているの」とよく揶揄されるのですが、今も非常に役に立つ研究が行われています。

原子炉の利用で一番多いのは、放射化分析と呼ばれるものでございます。放射化分析は、元素の微量分析に使われます。それから、放射線を浴びると材料が変化します。それを材料照射効果と申しますが、そのような研究、また物質科学とか生命科学では、生体高分子などの物質中のどこに水素や軽い元素が存在しているかを見つける、構造解析の研究を行っています。先ほど九後さんのお話にありましたように中性子には波の性質がありますので、それを利用した構造解析の研究も行われています。



中性子ラジオグラフィーと言いまして、中性子で写真撮影もしています。ユリの花など、X線で透過写真を撮ると鮮明な画像は得られませんが、中性子で撮ると非常にきれいな透過画像が撮れます。

その他、核物理の研究として、新しい原子核を見つけるような研究も行われています。

先ほどお話し致しましたように、一番多いのが中性子放射化分析、微量元素の分析です。私達の研究所で特筆すべきものとしては、もうかなり以前のことですが、イタイイタイ病の原因物質がカドミウムだということを、この方法を用いてつきとめました。

また、ノーベル化学賞を受賞された白川英樹博士は電気を通す高分子を発見されましたが、そ

の中に金属が入っていないことを証明するために、私達の研究所の原子炉を利用されました。

その他にも宇宙由来物質の研究に利用されています。実は宇宙由来物質にはイリジウムという元素が含まれています。皆さんは地球の中心にあるマントルが主に鉄で構成されていることをご存知だと思いますが、その鉄が地球の中心部に集まるときに同族のイリジウムと一緒に連れて入ったことから、この元素は地上にほとんど存在しません。だから、これが見つかり、宇宙から飛んできたものだということが分かります。世界的には、このような研究を通じて、恐竜がどうして絶滅したか、巨大隕石が地球に衝突したために絶滅したという仮説が正しいということが証明されることになりました。

中性子捕捉療法については後ほどお話し致しますが、私達の研究所では世界をリードする医療研究を行っています。

先ほど、物質構造の解析と申しましたが、これは中性子の波の性質を使って、最近では水素を吸蔵する炭素などの構造に関する研究が行われています。また、どこに水素が吸蔵されるのかというようなことを調べる研究も行われています。それから中性子ラジオグラフィーは、X線写真では鮮明に撮れないような画像が得られるということで、中性子放射化分析などとともに、考古学にも利用されています。

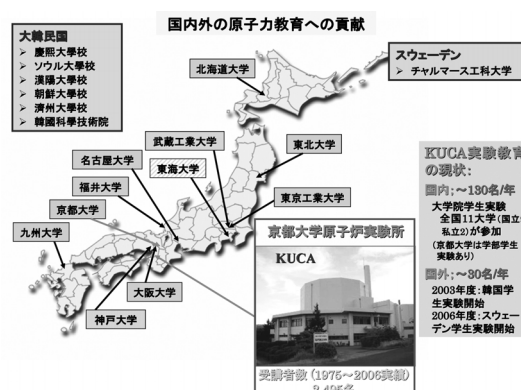
未知の原子核については、私達の研究所で5つの新しい原子核を発見しています。その他、中性子を利用するのに、今や私達の原子炉は比較的出力の低いものとなってしまいましたが、中性子を原子炉から外に如何に効率よく取り出して利用する場所まで導くかということを考え、中性子反射鏡の開発を行っています。これについては、その性能の世界記録をここ4～5年ずっと保持し続けています。

もう一つ、臨界集合体と呼ばれるミニチュアの原子炉がございます。これは、先ほどの5キロワットで運転する原子炉よりも約10年遅れて建設されました。そこでは核分裂連鎖反応の特性に関する基礎研究を行っていますが、世界に誇る原子力教育を行っていることは特筆に値します。

この臨界集合体は非常に変わっておりまして、12角柱の建物の中にミニチュアの原子炉が3つ格納されています。どうも私達の研究所では、先ほどの原子炉は8角柱で、これは12角柱というように角数を増やす傾向にあったようです。次に造るのは何角柱かなと思っていたわけですが、それはさておきまして、一つの建物の中にある3つの原子炉を合わせて一つと数えることになっています。このところ新聞紙上を賑わしている制御棒を動かす装置は一つしかありませんので、それをクレーンで運転したい原子炉に持って行くという形になっています。それで一つの原子炉として扱われています。

これに加えて、先ほどの九後さんのお話にも出てきましたが、加速器という装置が建物内に設置されています。3つの原子炉の中で水を減速材とするものを使って、国内のみならず外国をも対象として原子力の実験教育を実施しています。

実は、昭和50年から国内を対象に原子力の実験教育を始めましたが、近年、どんどん受講者が増えてまいりました。国内では全国11の大学から学生を受け入れており、現在、毎年約130名近くになり



つつあります。数年前からは国外からも毎年約30名、韓国とスウェーデンから学生を受け入れています。

基本的には月曜日から1週間の泊まり込みで講義と実験を集中して行っています。最近、大学では実際の原子炉を使って実験が行えるところは、もうここしかないと言っても過言ではない状況になっており、同様な状況にある世界からも注目を集めているということでございます。

もっと沢山の学生さんを受け入れたいのは山々ですが、なかなか人とお金の点でままなりません。火曜日には、右の写真に示すように、実際に核燃料を学生さんが手にして原子炉を組み立てるところから始めます。実際に原子炉を運転することも経験してもらいます。

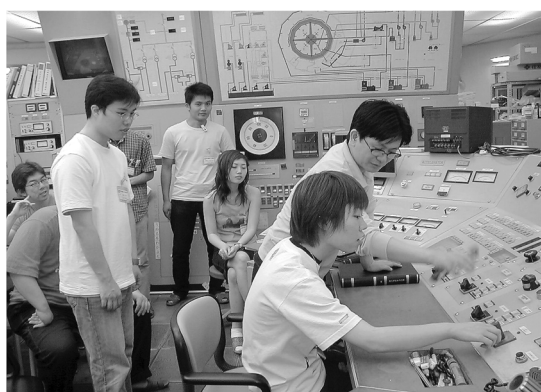
学生さんが原子炉を運転するのを横から見ている私達ははらはらしています。運転の操作を間違っても原子炉は止まるだけですから、安全上、心配することは何もないのですが、止まるたびに法規制に基づく報告などの非常に煩雑な手続きが必要になり、これに時間を要します。困ったことに、場合によっては所定の教育を完了することができなくなってしまいます。制御棒がどれぐらいの効果を持っているか、原子炉中で中性子がどのように分布しているか、などというようことを測定する実験を次々に行い、最後に結果発表・討論会を行います。

現在、このKUCAという臨界集合体を使って次の新たなプロジェクトを開始しています。それが、加速器で原子炉を動かすという新しい概念に基づくシステムの基礎研究でございます。先ほど九後さんのお話にありました中性子が原子核に当たりますと、いろいろな核反応を引き起こします。ウランなどの重たい原子核は核分裂の反応を起こして、複数の軽い原子核に変わります。このとき、アインシュタインの式に従って質量がエネルギーに変わります。皆さんもよくご存じだと思いますが、エネルギーがたまっておられる方、ちょっと太り過ぎの方は、運動してエネルギーを使うと体重(質量)が減ります。質量とエネルギーはイコールだということで、余り関係ないかも知れませんが、核分裂の反応で非常に大きなエネルギーが出てきます。

これとともに私達が科学研究を進める上で注目したいのは、中性子が複数出てくるということです。この中性子を研究用に使うということが研究用原子炉の基本でございます。

私達はKURという原子炉を今までずっと研究用に使ってきました。核分裂の反応ではせいぜい2~3個の中性子しか出てきませんが、核破砕と呼ばれる反応では原子核がバラバラに碎かれますので、中性子が非常に沢山出てきます。これを使おうと考えた次第です。

原子炉における核分裂の連鎖反応では、例えばウラン235に中性子が当たりますと、ウランが中性子を吸収して不安定になり、分裂して熱エネルギーと中性子を2~3個出し、その中性子によって連鎖的に核分裂の反応が続きます。この熱エネルギーを発電に利用するのが原子力発電所です。



私達の研究用の原子炉というのは、この中性子を利用するものでございます。いずれにしても連鎖反応を安定な状態に維持する際、中性子が次から次へと核分裂反応を起こしていくわけですが、余分なものは中性子を吸収するもの、制御棒などで吸収し、その数を調整してやる必要があります。

原子炉の中では、ご存じだと思いますが、核分裂をした原子核は2つに分かれます。これらはいつまでも放射能を持つわけではございませんが、しばらくの間は不安定で強い放射能を持った状態になります。この不安定な原子核は熱と放射線を出して安定なものに変わるわけですが、原子炉を止めるだけでは安心できないということになります。ですから原子炉の安全確保の3原則は、まず止める、それから冷やす、閉じ込めるということで、分厚い隔壁の中に閉じ込めて運転することが原則になっています。

この原子炉は、臨界状態で運転します。ちょっとややこしくなるかも知れませんが、臨界、未臨界、超臨界という3つの状態、JCOの事故で臨界は一躍有名になりましたが、これらについて若干説明させていただきます。

核分裂を起こしますと、2～3個の中性子が発生します。この中性子が次の核分裂を引き起こすわけです。臨界というのは、このうちの1個だけが次の核分裂を引き起こすようにした状態です。通常、ある一定の出力で運転している原子炉の中では、この臨界状態が維持されています。原子炉の出力を上げるのにどうするのかというと、しばらくの間、1個以上の中性子が次の核分裂を引き起こすという超臨界の状態にします。その後、臨界の状態に戻すということを制御棒等の操作で行うわけです。

止めているときとか、出力を下げているときというのは、1個以下の中性子が次の核分裂を引き起こすようにした未臨界の状態です。通常、原子炉ではこのようにして運転しています。つまり、臨界を基本として、超臨界、未臨界という状態を繰り返しているわけです。

ここで、未臨界の状態で核分裂の連鎖反応を維持するということを考えてみましょう。そのためには外から中性子を供給してやる必要があります。足りない分を、核分裂を引き起こす中性子が1個弱となっているところに丁度1個となるような数の中性子を外からいつでも補給しておいてやれば連鎖反応を維持することができます。そのようにして運転をしようという考えでございます。

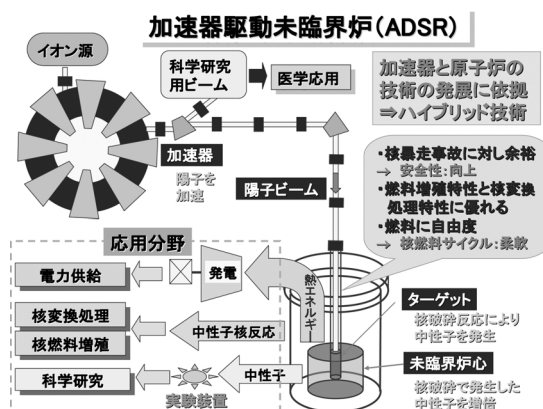
実は、原子炉の一番の大きな事故というのは、ある程度を超えて超臨界の状態になったときに暴走状態になると言われています。チェルノブイリの事故が一つの例でございますが、あのような状況になってしまいます。これは超臨界の限度を超えるからです。もともと未臨界の状態にしておき、せいぜいなくても僅かに超臨界にしかないというものであれば、暴走するというようなことはあり得ないということで、より安全な核分裂連鎖反応のシステムになると考えられるわけです。

この加速器駆動未臨界炉の研究の歴史としては、最初は1960年代に登場しました。核燃料を増やすのに使おうと考えたものでした。中性子を沢山外部から供給して核変換反応を利用して燃料をつくってやろうと。その次は、核融合炉はなかなか実現できそうもない、核融合反応で実は沢山の中性子が出てくるわけですが、その核融合炉はできなくても、核融合反応で出てくる中性子を使って原子炉を運転するというようなこともあるんじゃないかと考えたものでした。

このように、核融合－核分裂のハイブリッド炉の研究に移りました。今はイタリアのルビアさんというノーベル物理学賞を受賞された方が、エネルギー増幅器という概念を提唱して、原子力

界以外の有名人がこういうことを言い出したこともあり、一躍有名になって世界に広がりました。

その中で特に注目されているのは、長寿命の放射性核種を安定なものに、あるいは寿命の短いものに変える核変換処理用として使うということでございます。その加速器駆動未臨界炉の模式図を右に示します。私達としては中性子を利用したいと考えていますので、加速器を利用してできるだけ多くの中性子を発生させ、核分裂の連鎖反応により中性子の数を増やして利用したいので、加速器と未臨界の原子炉を結びつけるということを考えたわけです。



これは加速器と原子炉の技術が発展したお陰でこのようなシステムが考えられるようになってきたということですが、まだすぐ実現できるという状況にはなっていません。このことから、今まさに基礎実験を大学の研究所で始めようとしているところです。

最終的には、このシステムでエネルギーをつくり出すということも考えることができます。今世界的に注目されているのは、このシステムの中で中性子が引き起こす核反応で、寿命の長い放射性の核廃棄物を寿命の短いものに変えるという核変換処理、あるいは燃料が不足しないように燃料をつくるという核燃料の増殖、という機能を持っている点です。

私達が注目しているのは、沢山の中性子を発生させることができるということです。私達の原子炉が建設後もう40年以上経っておりますので、そろそろ次の展開を考えないといけないということもあって、これに関する基礎研究を始めたわけでございます。

そのためには、まずある程度強力な中性子源となる加速器を開発する必要があります。それから、未臨界の状態にある原子炉はどのようなものか、その物理というのが、実は今のところあまりよく分かっていると言える状態にはありません。これは、未臨界の原子炉というものを稼働させてみないと実際の特性は分かりませんが、これを稼働させようとする、先ほど申しましたように外から中性子を補給しなければなりません。未臨界の原子炉は外から供給する中性子の強さによって出力が決まってしまうので、弱い中性子源を使っているようでは、出力が低すぎてその特性を測定しようとしてもできないということが起こります。そういうことで、なかなか未臨界の原子炉の物理に関する研究は行われてこなかったという事情がございます。この部分に京都大学の原子炉実験所が挑戦しようということを考えている次第です。

なぜ、この研究を行うのかということですが、先ほど申しましたとおり、研究用原子炉の次の、あるいは代替の中性子源として期待をしているからということでございます。すぐに使えるようになるとは考えていませんが……。これを導入することによって、新たな共同利用の研究が展開できるであろうという期待を抱いています。一つは高エネルギーの陽子を使うということができます。それから高エネルギーの中性子を使うということもできます。原子炉というのは通常は一定の出力で定常的な運転を致しますが、加速器で外部から中性子を打ち込んでやると、パルス的にパン、パン、パンと断続的に中性子を出すようなこともできるようになるので、用途が広がるのではないかと期待しています。

加速器駆動未臨界炉のプロジェクトをカート・アンド・ラボ(KART&LAB)プロジェクトと呼んでいます。これは、Kumatori Accelerator-Driven Reactor Test Facility and Innovation Research



Laboratoryの下線部をつなぎ合わせて作った呼称ですが、イノベーションリサーチラボという建物の中にFFAG加速器というものを設置しまして、それからの陽子ビームを隣の臨界集合体棟まで導いて実験をしようというプロジェクトでございます。幸いにも文部科学省のプロジェクトに採択していただき、推進しているということでございます。

採択されましたのは平成14年のことございまして、文部科学省から「加速器を格納する建物を京大で用意しなければ、プロジェクトとして採択できない」と言われまして、前総長に「バラックでもいいですから建てて下さい」と泣きつきに参りました。今ではバラックでなくてよかったとつくづく思っていますが、幸いにも補正予算がついて立派なものになりました。

このための予備実験をしておく必要がございます。予備実験をするためには、加速器と未臨界の原子炉があればいいということで、KUCAという先ほど申しましたところに、核融合の反応で中性子を出せるものがありますので、それを使おうじゃないかということになりました。コッククロフト・ウォルトン型の加速器で、重陽子のビームを三重水素の標的に当てて核融合の反応を起こさせ、中性子を発生させます。その中性子を未臨界状態にある原子炉に供給して、それでいろいろな特性を測っておこうということで、現在、研究を進めているところでございます。

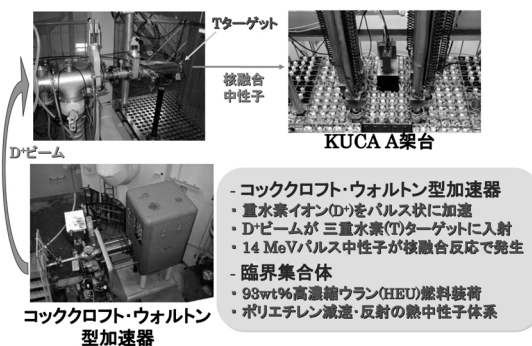
臨界集合体には先ほど3種類の原子炉があるというように申し上げましたが、そのうちの2つは固体減速架台と呼ばれています。そこでは、水の代わりに減速材としてポリエチレンあるいは黒鉛を使い、ウランあるいはトリウムなどの核燃料になり得るような物質を混ぜて、ちょうど幼稚園の子供が積み木細工をするような形で、それを角パイプの中に詰め込んで燃料体を作り、それを集合体の形に配置します。そこに中性子を打ち込んで研究を行っているところでございます。

コッククロフト・ウォルトン加速器から真空になっている管の中を通して重陽子のビームが、三重水素のターゲットに当たり、核融合反応で中性子が発生します。それを未臨界の原子炉体系に打ち込むという格好で研究を進めています。

加速器の開発については、FFAG加速器というものを開発しようとしています。実は、この原理が提案されたのは1953年のことで、大川千弘博士という、今は多分ゼネラルエレクトリックの非常に高い地位にいらっしゃる、海外流出の最たるものですが、方です。日本人が原理を提案しました。加速器の種類として、サイクロトロンとかシンクロトロンと呼ばれるものはよく知られています。年配の方の中には、FFAGをシンクロサイクロトロンと呼ばれる方もいらっしゃいます。

ところが、長年、なかなか陽子を加速するものはできなかったのですが、1998年に高周波加速空洞と呼ばれる部品をマグネティックアロイというものを使って作ることができました。これで一気に高帯域かつ高電場強度の高周波加速装置ができたということで、2000年に世界初のFFAG陽子加速器の原理実証器というものが高エネルギー加速器研究機構で完成したわけです。この頃からずっと私達とは共同研究をしていた関係もありまして、今はこれを担当しておられた先生に私達の研究所に来ていただいて、一緒に研究をしているということでございます。カート・アンド・ラボプロジェクトを開始したのは2002年のことでございます。

#### KUCAにおける加速器駆動未臨界炉の予備実験



昨年の8月に撮った写真を右に示しますが、イオン源で陽子を作りまして、それを100キロエレクトロンボルトという低いエネルギーで、100キロボルトの電場に電子を置くと100キロエレクトロンボルトというエネルギーを持って運動すると、そのようにお考えいただければいいと思いますが、加速をして次の装置に持っていきます。イオンベータと呼んでいるところで反時計方向に回しながら、2.5ミリオンエレクトロンボルトまで加速をします。イオンベータの部分にはいろいろと世界初の試みが詰め込まれています。担当者達は非常に苦労したようですが…。



3段のFFAG陽子加速器(2006年8月撮影)

その次にブースターというのがございますが、ここでさらに20ミリオンエレクトロンボルトまで加速して、さらに主リングで150ミリオンエレクトロンボルトまで加速して、それからビームラインを通してKUCAという、先ほどの臨界集合体まで陽子を導いて行きます。ビームラインの総延長は50メートルほどございます。

もし、完全にでき上がっていて、今日、そのお話ができれば非常に良かったのですが、残念ながら昨年11月に落雷がございまして、電源関係に重大な故障が発生し、今はまだ修復に躍起になっているところです。今年の8月から実験を開始する予定ということになってしまいましたが、このFFAGで加速した陽子ビームを、隣の建物に組み立てた未臨界の原子炉体系のところまで導いて行って、そこで実験をするということになります。この実験は世界で初の実験になる予定でございます。

#### KUCA-FFAG結合実験のイメージ図



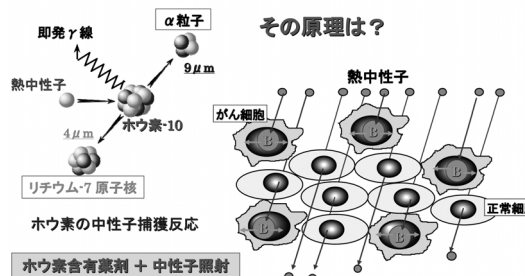
さて、中性子でがんを治すというお話に移りたいと思います。

原子炉の放射線を浴びるとがんになると思っておられる方がいらっしゃると思いますが、がんを治すというお話でございますので、よろしくお願いします。

この治療法をホウ素中性子捕捉療法と呼んでいます。

ホウ素というのは、実は、皆さん、年配の方はよくご存じだと思いますが、目を洗うときにホウ酸水というのを使いました。あのホウ酸の中にホウ素が含まれています。天然のホウ素の中に10数%含まれているホウ素10という同位体を使って、がん治療をしようということでございます。このホウ素は中性子を吸収しますと、 $\alpha$ 線として知られている $\alpha$ 粒子、これはヘリウムの原子核ですが、それとリチウムの原子核、これを放出して分裂します。この原子核の飛ぶ距離がそれぞれ9ミクロン、4ミクロンで、ちょうど細胞の大きさぐらいになっています。だから、ホウ素が完全になん細胞だけに取り込まれるという状況をつくると、周りの細胞は、正常細胞は中性子そのものでは死にませ

#### ホウ素中性子捕捉療法 Boron Neutron Capture Therapy (BNCT)



るので、ホウ素のこの反応を起こしたもののだけが死ぬことになり、非常に理想的な治療が行えるということでございます。

そういうことで、普通の放射線療法と違うのは、ホウ素を含有した薬剤を使うところです。それに中性子を当てる。そこで反応を起こさせて、結局は放射線療法、放射線でがんを治すということになるわけでございます。

ここで、良性腫瘍と悪性腫瘍の違いは何かということを考えて見ましょう。いわゆる腫瘍細胞等が固まっていて、正常細胞との境界がはっきりしているものは良性腫瘍と呼ばれています。がん、悪性腫瘍と言われているものは、腫瘍細胞と正常細胞が入り交じっていて、この境界がはっきりしないということでございます。このような特徴があるわけです。

この中で、比較的腫瘍細胞のある部分が限局されているものであれば、その部分にだけ放射線を当てて殺すということが出来るかも知れませんが、非常にばらばらと入り混じっているような場合には、放射線でがん治療を行うことが難しくという考えが成り立ちます。

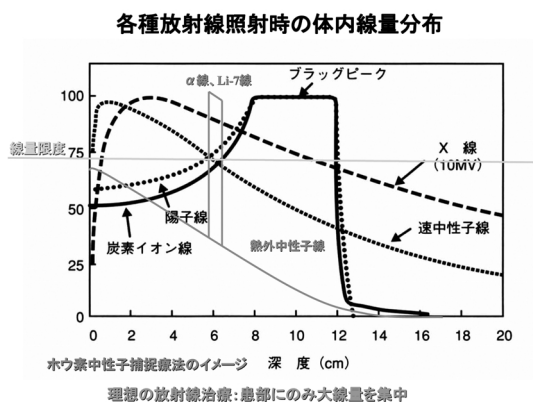
通常の放射線でがんを治すという方法は、正常細胞とがん細胞を比べてみたら、がん細胞のほうが先に死んで、正常細胞は生き残っていると、そういう状態のときに非常に放射線治療はいいということです。そういうような種類のがんには放射線治療が非常によく効きます。ところが反対の場合もあるわけです。放射線に対する感受性のがん細胞のほうが強いということになりますと、とたんに効かなくなるわけです。そのような場合には、がん細胞だけに放射線を当てるように、できるだけ限局して照射するということになります。

皆さんご存じのように、がん治療の3つの主な方法としては、手術療法、それから抗がん剤を使う化学療法、それと放射線療法というのがあります。実は、日本の中では放射線療法の占める割合が世界と比べて非常に少ない、異常に少ないと関係者から言われているというような状況にあります。手術をしますと、がん細胞が完全に取り去られたとすれば体の中には一つも残らない状態になります。ただし、先ほどのように入り交じっていると、沢山取らないといけないので、体に対する負担は大変なことになるということでございます。抗がん剤の場合はじゅうたん爆撃方式ですから、正常細胞まで死んでしまうということが起こる可能性があるということになります。

放射線でがんを治すときの考え方は、体内にがんがあるとして、普通のX線を当てるとこれこれの線量を与えることができる。要するにがん細胞にあるエネルギーを与えと、このエネルギーの大きさは細胞が死滅することと非常に密接な関係を持っているので、殺すことができるわけです。

10メガボルトのX線であれば、体内に入って3～4センチぐらいのところに線量のピークを持ちますから、その辺りのところを狙うというのが非常に多くなります。現在は、これを幾つかに分けて、深いところでも多方向から照射をし、がんの部分だけに沢山線量を与えるというような工夫がなされています。

中性子は、初めの頃はエネルギーの高い中性子ほど治療効果が高いと考えられていましたが、なかなかこれがうまくいきませんでした。失敗したということです。今、注目されておりますのは、陽子線とか、炭素線ですね。これはあるところで最大の線量を与えることができます。8セ



ンチとか12センチとか、エネルギーによって変わるわけですが、そういう深いところにあるがんに集中的に線量を与えることができるので、その部分だけを殺すことができるということです。

さて、ホウ素中性子捕捉療法では、どうするのかということです。実はこれ以上のものは正常細胞に害を及ぼすよという線量があるとして、この線量を超えたところは、そのまま当てると当たった部分はみんな死んでしまいます。ところが、中性子だけを当てても死なない状態にしておいて、で、あるところに限局してホウ素が入っているということがあって、そこだけで反応が起こってくれば、線量がその部分だけ高くなるということが起こります。ということは、その部分だけが死ぬということが期待できることになります。これを21世紀のがんの放射線療法だと言っているわけです。がん細胞だけを狙い撃ちに、放射線の威力を増す、薬と併用して、ということです。これがホウ素中性子捕捉療法でございます。

要するにがん細胞のところだけを殺してしまう、こういうことができる。これが理想の治療法だということで、これを目指して、今、私達の研究所で取り組んでいるということでございます。

それに、研究用の原子炉を使うということでございまして、エネルギーをうまく調整して、中性子を取り出します。その取り出した中性子をがんの患者さんに照射をするという形で治療を行うということでございます。

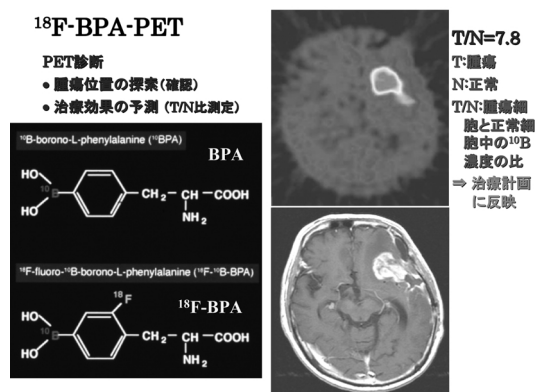
それに使うホウ素化合物には、ボロカプテイト BSH とパラボロノフェニルアラニン BPA という2種類のものがございます。BSHの方は昔から脳腫瘍に使われており、脳腫瘍用にもともと開発されたものです。BPAは1994年に、どちらかと言えば皮膚がん、悪性黒色腫用に開発されたものということでございますが、この2つのものを、今、私達の研究所では併用して使っています。

このBPAを使いますと、これにはフッ素18という、放射線を出すものをくっつけることができます。こういうものをくっつけますと、ペットPETで診療ができるわけです。CT写真で脳の白く写っている部分に腫瘍がありますが、そこにBPAがどれだけ集まっているかということが分かるわけです。

周りの正常細胞と、腫瘍の部分に集まるBPAの比率が、右の写真では7.8という大きな値になっており、がん細胞に沢山BPAが集まっていることが分かります。これが分かると、その部位にどれだけ多くの中性子を当てたらいいのかということが分かりますので、治療計画に使っています。

実は私達の研究所では、脳腫瘍の患者さんに昭和49年、1974年に第1例目の照射を行いました。実は私が研究所に就職した年でございますが…。私はその頃というか、つい最近まで原子炉の運転をしていました。当時は、原子炉を運転していますと、まさに手術をしているところを上から覗くことができるというような状態で治療をしていたものでございます。

患者さんが来られると、開頭手術をして中性子を当てるという状況でした。これは、当時は治療に使う中性子のエネルギーが低くて、絶対に体内の深くまでは届かないという状況でしたので、こういう治療法を採用していたということでございます。



このように、以前は照射前に手術をすることが必要でした。実は、放射線治療の一番いいところは、手術をしなくてもいいところなのです。ところが、この治療法では手術をしないとイケない。このことから、以前、この治療法はあまり広がらなかったということがございます。現在の治療においては、手術をする必要がございません。今は手術をする必要がなくて、患者さんに原子炉のとある設備に入っていただいて、大体1時間前後、短くて30分、長くて1時間半程度、中性子を照射します。軽い場合は麻酔もしないという状況です。

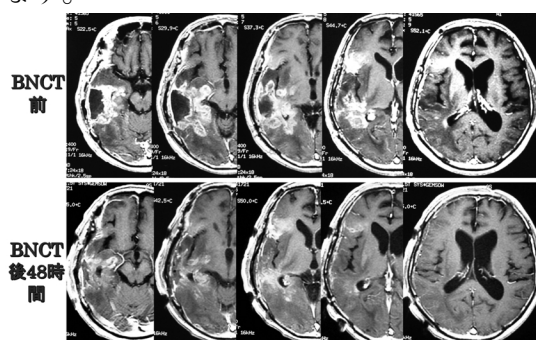
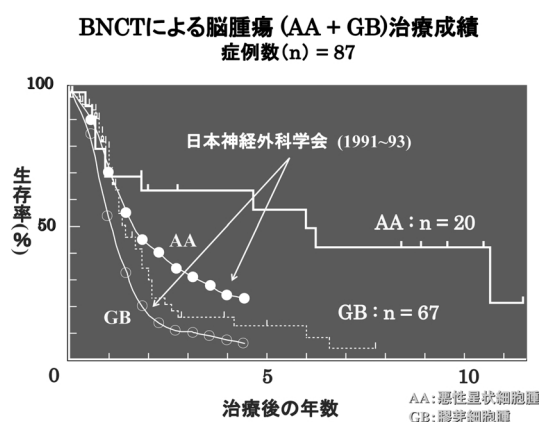
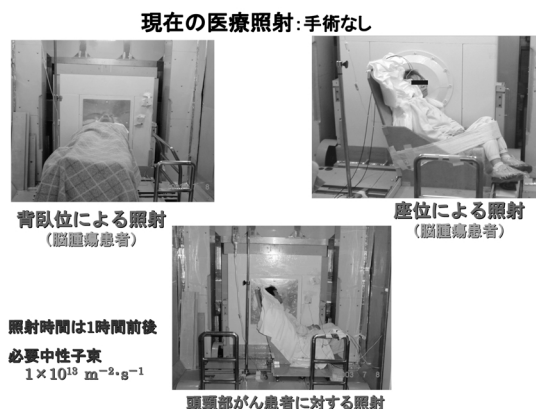
奥の方が原子炉になっていますが、そちらから中性子がやってきます。その中性子が患部に当たって、もちろんホウ素化合物の薬を注射した後ですが、上の写真のような形で中性子の照射を受けていただくということになります。脳腫瘍の患者さんの場合、寝た状態、あるいは部位によってはお座りになった状態で中性子を照射します。頭頸部がんで、顔や頸部にできるがんについては、お座りいただいて中性子を照射しています。

右に脳腫瘍の治療成績を示します。ちょっと古いデータではございますが、日本神経外科学会が発表しているものと比較してあります。グリオブラストーマ、膠芽細胞腫GBと言われるものと、悪性星状細胞腫AAについて、治療後の年数を横軸にして縦軸に生存率を示したものです。私達の研究所の治療成績をご覧くださいますと、悪性膠芽細胞腫は非常に悪性らしくて、なかなかいい方法がないようですが、それでも若干改善しており、悪性星状細胞腫については、かなり改善しているという結果になっています。

ホウ素中性子捕捉療法については、私達の研究所では共同利用研究という形態で治療を行ってきたわけですが、今現在、原子炉実験所には病院がありませんし、外部の方に開かれた診療所もございません。従いまして、これを新しい高度先進医療として私達の研究所から申請することができません。これにつきましては、大阪のとある大学にお勤めで、共同利用研究に参加していただける京都大学出身の方が今申請中という状況でございます。

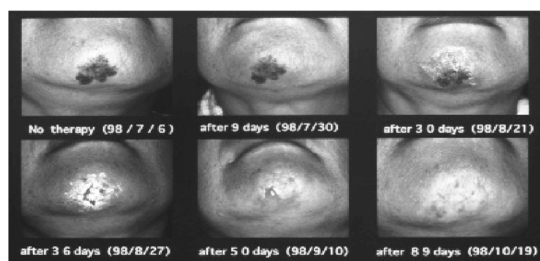
ホウ素中性子捕捉療法で悪性脳腫瘍の縮小の程度を右に示します。治療の前後2日で明らかな差が見られます。2日後には、もうほとんど治っているという状態になっています。非常に早く効く。しかも照射は1回だけです。通常は放射線治療というのは、何回にも分けて照射するというのが普通ですが、1回だけの照射で治療が済むということです。

ただ、奥深いところにあるものについては、治療6カ月後に再発してしまったということなどもございました。体内の非常に深いところにあるがんについては、残念ながら中性子は届かない



ということがあって、もっと沢山がんが集まる薬ができればこの状況も変わると思いますが、今現在は治療効果が期待できません。FFAG加速器などが完成し、陽子などが利用できるようになれば、深い部位はそれで治療を行うことができると期待しているところです。

右は悪性黒色腫です。黒子のがん化したものとお考えいただければいいと思います。これを外科的に手術することになると大変で、顎がほとんどなくなってしまいます。ですから、女性の患者さんはこのようながんになると手術は絶対嫌だ、死んでもいやだと言われるので、ホウ素中性子捕捉療法を選択される方が多いようです。この写真の場合は、大体3ヶ月できれいに黒色腫がなくなりました。



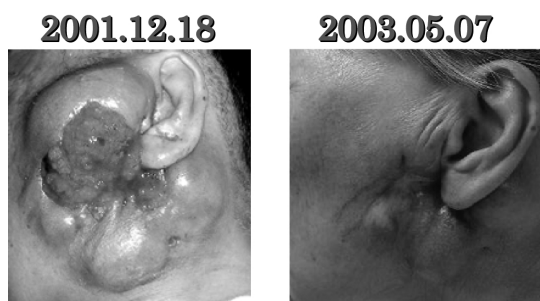
右は足の裏で、治療後の時間経過を示します。足指の付け根にできています。これも手術をすると足指がなくなる可能性がありますので、中性子捕捉療法を選ばれました。手術をすると治っても、もとのような状態で歩くということにはできないと思いますが、この療法のいいところは、治れば歩いて元の状態に復帰できるというところでございます。



このがん治療、中性子を使ったがん治療は、脳腫瘍の場合には、良くない表現ですが、以前は他の治療法では治らないと見放された方だけが受けていらっしゃいました。黒色腫の場合は、体の表面にできるということで、手術を受けたくない方が治療に来ておられました。しかし、今は、これが違う種類のがんにも適用が広がってきています。先ほどのBPAという薬を使って、PET診療を行ってみますと、耳下腺がん、骨肉腫がん、歯肉がんなどについては、先ほどご紹介しましたように、がん細胞と正常細胞へのホウ素化合物の集まり方を比率で表してみますと、そこそこの比率になっていることがわかりました。大体この比率が3以上であれば、ホウ素中性子捕捉療法が適用可能と考えられていまして、今はこういうものに対して適用を試みているところでございます。

現在、適用症例の拡大に大きな期待を寄せているところですが、まだ研究は始まったばかりというところでございます。肺がん、肝臓がん、あるいは中皮腫、こういうものに対しても、今、適用を検討しているところです。ただ、体内深部のがんに対しては適用限界があるというのが現状ではございますが、深部にできたがんであっても、あるものには使えるという可能性が出てきています。

右は耳下腺がん、おたふく風邪で膨れるところにできたもので、再発したものでございます。がんが外にはみ出している状態にあったのですが、これに対して3回の中性子照射を行いました。写真が少し暗いのですが、最終的にはきれいに治療することができました。

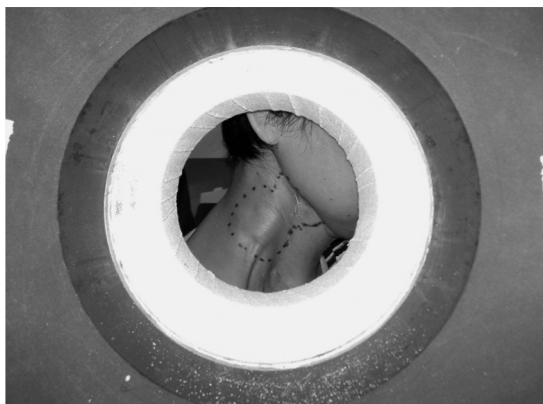


これは実は脳や皮膚にできたがん以外に適用した初めての患者さんで、この治療を実際担当された先

生方、お医者さんも、こんなに素晴らしい効果があるとは思っておられなかったようで、非常に驚かれたと聞きました。これはいけるということで、この後、頭頸部のところにできたがんの患者さんに対する治療が非常に増えている状況にあります。

口腔蓋がん、口の奥の口蓋のところにできるものでございますが、それにはカテーテル法を使い、動脈からホウ素化合物の薬剤を注入して、それがちゃんと患部に集まることを染色するなどの方法でも確認した上で中性子照射をしています。4日後にはがんの部分がきれいになっていくという状況になっています。

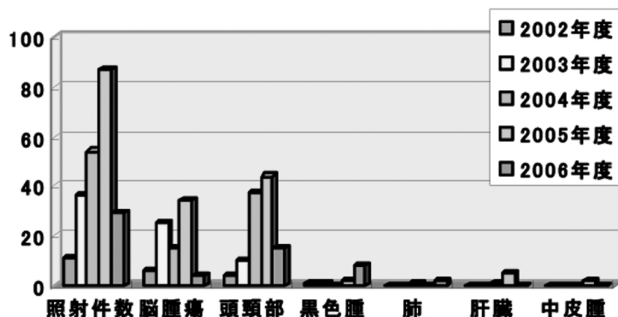
右は唾液腺のところにできたがんに対する中性子照射の様子を示したものです。この方は、既に手術を受けておられ、手術の跡が残っていますが、そこに再発したものです。他の放射線療法との大きな違いは、この写真でお分かりいただけたと思いますが、非常に大きな穴を通して中性子を当てるところです。通常の放射線治療は、正常な細胞を殺してしまうので、がんのある部位しか放射線を当ててはいけませんから、放射線を絞るということをします。



しかし、中性子の場合は、中性子そのものでは正常細胞が死なないようにになっていますので、広い視野が取れることになります。あんまり広くし過ぎますと、今度は当たるところの中性子の数が少なくて、あまり効かないということになる可能性もありますが…。

この方は一旦回復されましたが、また再発するということが起こりました。このため、もう一度治療を行い、今はきれいに治っています。

右に示しますように、適応症例の拡大につれて、ホウ素中性子捕捉療法の照射件数は増加しています。これは2002年から2006年の照射件数を示したのですが、2002年までは、多くても毎年10件ぐらいだったわけです。それがその後、10から、37、54、87件というように年々増えてきました。



残念ながら今は私達の原子炉が止まっておりますので、中性子照射については茨城県にある日本原子力研究開発機構の原子炉を使わせていただいているということで、少し減っています。私達の研究所のお医者さんが患者さんを連れて治療をしに行くということで、治療の数が減ってしまったということがございます。これがまた私達の研究所の原子炉が運転を再開しますと、恐らく過去の最高件数を超えるような格好で増えていくのではないかと考えてます。

最近では肺がん、肝臓がん、中皮腫などというものに対しても適用を検討中で、実際に適用を試みています。その結果をみて広く適用するかどうかの判断を行うことになります。

実は、先ほど申しましたように昭和49年、私が入所したときに1例目の治療を実施しています。それからずっと長い間、基礎研究を積み重ねて、ちゃんとホウ素化合物の薬剤ががん細胞に集まるか、どれだけの量の中性を当てたら良いのかというようなことと、それから原子炉の改造そのものも行って医療照射用の設備を整備し、やっと今の状況に到達したわけでございます。

今、原子炉実験所としましては、私の前の所長の時代から「くまとりサイエンスパーク構想」



の実現を目指して活動しています。これは「地域に根ざし、世界に広がる科学の郷」という形で原子炉実験所を再生し、活性化しようという考えに基づいて生まれたものです。右の図は建物群だけを示してありますが、今後はこのような形に整備していこうと考えているということでございます。

現在のところは、創設後10年程度の間に建設された建物群にイノベーションリサーチラボ棟が漸く新たに加わっただけという状態ですが、整備に向けて歩み出しました。今後は残りの建物群を何とか頑張りがちながら建設して行きたいと考えています。そのためには、アトムサイエンスコンソーシアム、原子力科学の協同組合みたいなものを組織して、日本国内あるいは世界の研究機関などと結びつきを強めながら、その組織の輪を広げていきたいと考えています。

さらに、「くまとりサイエンスパーク構想」の成果を地元地域の活性化に活用しようということについて、私達からではなく、地元から有難いことにご提案いただきました。今、この「熊取アトムサイエンスパーク構想」の実現に向けて、歩みを進めているところでございます。

熊取町、大阪府、京都大学の三者要望として、去年、今年と連続して国に対する要望を行いました。その際、官・公・学・民という、これは後で講演されます松本さんの発案ですが、「新しい用語を作って使えばどうか」と提案されまして、要望に入れて使わせていただいています。今後は構想の実現に向けて協議会を結成して、私達の研究所で生み出された成果を、成果と申しましても私達が担っているのは元来が基礎研究の部分ということでございますので、直接すぐに役に立つというのは先ほどのがん治療のような形になってきたものだけということでございまして、どれだけ生み出すことができるかは定かではありませんが、そういうものを、地元の活性化に役立てたいと考えて努力を続けている次第でございます。

本日はどうもご清聴ありがとうございました。(拍手)

終わり

